



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 42 08 172 B4 2006.05.11

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: P 42 08 172.6
(22) Anmeldetag: 13.03.1992
(43) Offenlegungstag: 17.09.1992
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 11.05.2006

(51) Int Cl.⁸: **H01L 31/103** (2006.01)
H01L 31/0312 (2006.01)
G01J 1/42 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
07/670,534 15.03.1991 US

(73) Patentinhaber:
Cree, Inc., Durham, N.C., US

(74) Vertreter:
Boeters & Lleck, 80538 München

(72) Erfinder:
**Edmond, John A., Apex, N.C., US; Carter Jun.,
Calvin H., Cary, N.C., US**

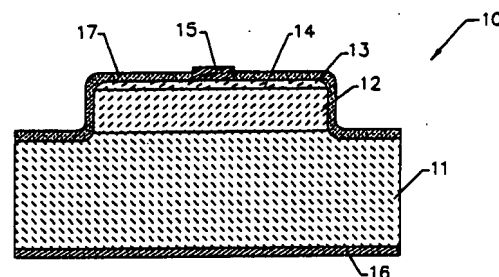
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
**DE 36 13 012 C2
DD 2 05 238**

**US 50 87 576
US 49 12 064
US 49 12 063
US 48 65 685
US 45 31 142
US 35 63 817
US 35 04 181
US 4 86 605**

**P.GLASOW et al.: SIC-UV-Photodetectors. In:
SPIE,
Optoelectronic Technologies for Remote Sensing
from Space, 1987, Vol. 868, S. 40-45;
H.C. CHANG u.a.: Detection of Ultraviolett Radia-
tion using Silicon Carbide p-n Junctions,
"In: Solid State Electronics, 1967, Vol. 10,
Seiten 949 bis 953;**

(54) Bezeichnung: **Hochempfindliche Fotodiode zur Feststellung von UV-Strahlung**

(57) Hauptanspruch: Hochempfindliche Fotodiode zur Feststellung von UV-Strahlung mit einem Einkristall-Substrat (11) aus Siliziumkarbid, das einen ersten Leitfähigkeitstyp hat, einer ersten Epitaxialschicht (12) aus Siliziumkarbid auf dem Substrat (11), die den gleichen Leitfähigkeitstyp wie das Substrat (11) hat, einer oberen, der einfallenden elektromagnetischen Strahlung ausgesetzten Epitaxialschicht (13) aus Siliziumkarbid auf der ersten Epitaxialschicht (12), die den entgegengesetzten Leitfähigkeitstyp wie die erste Epitaxialschicht (12) hat und mit dieser einen p-n-Übergang (14) bildet, und mit ohmschen Kontakten (15; 16) an der oberen Epitaxialschicht (13) und dem Substrat (11), dadurch gekennzeichnet, daß die erste Epitaxialschicht (12) eine soviel niedrigere Trägerkonzentration hat als die obere Epitaxialschicht (13), daß sich das Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (14) bei Gleichgewicht vorherrschend in der ersten Epitaxialschicht (12) ausbildet, daß die erste Epitaxialschicht (12) eine definierte Dicke hat, die zur Unterstützung des Verarmungsgebietes ausreicht und die größer ist als die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der ersten...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft hochempfindliche Fotodioden zur Feststellung von UV-Strahlung.

[0002] Die Feststellung von elektromagnetischer Strahlung verschiedener Frequenzen hat eine Anzahl von wichtigen Anwendungen. Wegen der gut untersuchten Beziehung zwischen Lichtenergie und verschiedenen physikalischen, elektrischen und chemischen Phänomenen, können viele derartige Erscheinungen durch die Frequenz (oder entsprechend durch die Wellenlänge) der elektromagnetischen Strahlung identifiziert werden, die sie emittieren oder absorbieren. Ein typisches Beispiel hierfür ist, daß die Bewegungen der Atome innerhalb der Moleküle zur Emission von Strahlung im Infrarotbereich des Spektrums führt. Übergänge innerhalb des Atomkerns führen zur Emission von Strahlung mit Röntgenfrequenz. Rotationsbewegungen der Moleküle führen zur Emission im Bereich der Mikrowellenfrequenzen. Elektronische Übergänge zwischen verschiedenen Energieniveaus in den Molekülen und Atomen führen zur Emission und Absorption im sichtbaren Bereich des Spektrums und, was insbesondere von Interesse in der vorliegenden Erfindung ist, im UV-Bereich des Spektrums.

[0003] Als kurze Hintergrundinformation sei angemerkt, daß die Merkmale von Lichtenergie meistens als Wellenlänge (die Länge eines vollständigen periodischen Wellenzyklus) und Frequenz (die Anzahl der Zyklen, die in einer gegebenen Zeitperiode auftreten) ausgedrückt werden. Bekanntermaßen sind die Wellenlänge und die Frequenz umgekehrt proportional zueinander und hängen von der Lichtgeschwindigkeit mit nachfolgender Beziehung ab:

Wellenlänge \times Frequenz = Lichtgeschwindigkeit bzw. ausgedrückt mit den üblichen Symbolen:

$$\lambda \nu = c$$

[0004] Somit führen längere Wellenlängen zu kleineren Frequenzen und kürzere Wellenlängen zu höheren Frequenzen. Umgekehrt ist die Frequenz des Lichts, das als Folge eines bestimmten Ereignisses emittiert oder absorbiert wird, direkt abhängig zu der mit dem Vorgang verbundenen Energie. Dies wird üblicherweise durch folgende Beziehung ausgedrückt:

$$E = h\nu$$

wobei E die Energie, ν die Frequenz und h die Planck-Konstante darstellt.

[0005] Die Feststellung von UV-Strahlung ist von besonderem Interesse, weil eine derartige Strahlung typischerweise bei Verbrennungsvorgängen auftritt. Somit können UV-Strahlungsdetektoren zwischen dem Vorliegen einer Verbrennung und dem Vorliegen von Wärme in einer Weise unterscheiden, die bei Infrarot-Strahlungsdetektoren, die die Gegenwart von Wärme ungeachtet der Gegenwart von Verbrennung anzeigen, nicht möglich ist.

[0006] Wie erwartet, führt die Fähigkeit zur Feststellung von UV-Strahlung zu einer Anzahl von wichtigen gewerblichen und militärischen Anwendungen. Als ein gewerbliches Beispiel sei angeführt, daß ein bestimmter Typ von UV-Detektor in jedem System, das UV-Licht zur Übertragung von Information verwendet, eine erforderliche Komponente ist. Weil UV-Licht eine höhere Frequenz als sichtbares Licht hat, kann es mehr Information tragen. Deshalb ist die Verwendung von UV-Detektoren bei faseroptischen Informationsübertragungssystemen und Verbindungen von besonderem Interesse.

[0007] Bei militärischen Anwendungen hat die Feststellung des Vorliegens einer Verbrennung, insbesondere in einer hochempfindlichen Weise, offensichtliche Vorteile, wie beispielsweise die Feststellung eines Flugzeuges, einer Rakete oder anderer Objekte, die durch charakteristische Verbrennungsprozesse angetrieben werden. Bei derartigen militärischen Anwendungen ist als weiterer Vorteil für den Detektor erwünscht, daß dieser "solarblind" ist. Mit anderen Worten kann, da der UV-Bereich und der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums einander gegenüberliegen, gewöhnliches sichtbares Sonnenlicht hinunter bis ungefähr 290 Nanometer (nm) zu einem Ansprechen des UV-Detektors führen, was entweder den Detektor für die Feststellung von UV-Strahlung untauglich macht oder weitestgehend seine Empfindlichkeit reduziert.

[0008] Ein Weg zur Feststellung von Strahlung, ungeachtet der Frequenz oder Wellenlänge, ist, ein Halbleiter ("Festkörper")-Material der Strahlung auszusetzen und das Ansprechen des Halbleiter-Materials festzustellen. Aus einer Vielzahl von gut bekannten Gründen sind Halbleiter besonders vorteilhaft für Detektorsysteme. Dies schließt typischerweise ihre kleine Größe, Stabilität, Zuverlässigkeit und die niedrigen Kosten ein. Fest-

körper-Fotodetektoren lassen sich in getrennte Kategorien aufteilen, die im allgemeinen Fotoleiter, Fotodioden und Fototransistoren umfassen. Ein Fotoleiter ist ein Bereich eines Halbleiter-Materials mit an gegenüberliegenden Enden angebrachten ohmschen Kontakten. Bei der Beaufschlagung mit einfallendem Licht werden Ladungsträger angeregt, was zu einem Anwachsen der Materialleitfähigkeit führt. Eine Fotodiode ist ein Bauelement mit einem p-n-Übergang und einem angrenzenden Verarmungsgebiet. Das elektrische Feld des Verarmungsgebietes trennt durch Lichtaufnahme gebildete Elektronenlochpaare, deren Bewegung einen meßbaren Strom erzeugt. Ein Fototransistor ist einem herkömmlichen Bipolartransistor ähnlich, hat aber einen großen Basiskollektorübergang als Lichtsammelelement. Von diesen Bauelementen ist die Fotodiode eine der meist verwendeten Fotodetektorbauelemente für sichtbares und ultraviolettes Licht.

[0009] Wie denjenigen bekannt ist, die mit derartigen Bauelementen vertraut sind, erzeugt die elektromagnetische Strahlung einer geeigneten Energie, die auf das Halbleiter-Material trifft, Elektronenlochpaare aufgrund eines normalen fotoleitenden Vorganges. Wenn diese Ladungsträger nahe bei einem p-n-Übergang erzeugt werden, trennt das elektrische Feld der Verarmungsschicht am Übergang die Elektronen von den Löchern in für einen p-n-Übergang üblicher Weise. Diese Trennung bewirkt einen Kurzschlußstrom oder eine Leerlaufspannung, auf die der photoelektrische Effekt zurückgeht.

[0010] Bei Abwesenheit einer äußeren Vorspannung erzeugen alle p-n-Übergänge einen Gleichgewichtszustand mit einer inneren Potentialsperre quer zum Übergang. Bei einer Sperrvorspannung können jedoch Minoritätsträger den Übergang überqueren und erzeugen hierbei einen kleinen Sperrverluststrom, der typisch für Flächendioden ist.

[0011] Bei Abwesenheit einer äußeren Vorspannung werden bei der Beleuchtung des n-Gebietes der Fotodiode Elektronenlochpaare erzeugt und Löcher (die die Minoritätsträger in dem n-Gebiet sind) nahe der Sperrschicht werden durch das elektrische Feld der Sperrschicht über den Übergang getragen. Dieser Strom von Löchern über den Übergang erzeugt einen Strom, der Fotostrom genannt wird. In ähnlicher Weise werden bei der Beleuchtung des p-Gebietes und bei der Erzeugung von Elektronenlochpaaren Elektronen (die Minoritätsträger in dem p-Gebiet) über den Übergang geführt, wodurch ein Fotostrom erzeugt wird. Der Hauptteil des Fotostromes wird erzeugt, wenn Licht in die Sperrschicht eintritt. In diesem Fall werden Elektronenlochpaare jedenfalls durch das elektrische Feld übertragen.

[0012] Die Wirkung des Fotostromes auf die Strom-Spannungs(I-U)-Kennlinie führt zu einer Verschiebung der normalen I-U-Kurve, bei der der normalerweise kleine Vorspannungsverluststrom in Sperrrichtung durch den Fotostrom vergrößert wird.

[0013] Die Größe des Fotostroms hängt von der Anzahl der erzeugten Ladungsträger ab, die wiederum abhängig von der Beleuchtung der Diode ist. Nichtsdestoweniger wird, wenn erheblicher Vorwärtsstrom durch die Diode fließt, der relativ kleine Fotostrom von dem typischerweise viel größeren Vorwärtsstrom kompensiert. Somit ist der Teil der charakteristischen Strom-Spannung(I-U)-Beziehung von Interesse, wo der Sperrstrom fließt; d.h. die Quadranten III und IV in dem Strom-Spannungsdiagramm einer beleuchteten Diode. Weiterhin werden aus demselben Grund Fotodioden normalerweise mit Sperrvorspannung betrieben. Dann kann der relativ kleine Fotostrom gegenüber dem relativ kleinen Sperrstrom (der in der Technik auch als Dunkelstrom bezeichnet wird) leichter festgestellt werden als gegenüber dem relativ großen Vorwärtsstrom.

[0014] Es ist somit verständlich, daß die geringfügige Hinzufügung eines Fotostromes schwierig festzustellen ist, wenn der Dunkelstrom einer Fotodiode unter Sperrvorspannung relativ groß ist; d.h. das Bauelement wird mangelnde Empfindlichkeit aufweisen. Als angenommenes Beispiel sei angeführt, daß, falls der Dunkelstrom bei einer Sperrvorspannung von 1 Volt (V) 1 Ampere (A) beträgt und der Fotostrom 0,1 A, der insgesamt festgestellte Strom 1,1 A betragen würde, wovon nur etwa 9 % auf die festgestellte Beleuchtung zurückgehen würden. Alternativ würde, wenn der Dunkelstrom bei der gleichen Sperrvorspannung lediglich 0,1 A beträgt, der hinzukommende 0,1 A-betragende Fotostrom 50 % des gesamten 0,2 A-betragenden Strom ausmachen, der bei der Beleuchtung der Diode anfällt, was zu einem proportionalen Anstieg führt, der wesentlich leichter feststellbar ist.

[0015] Deshalb ist ein relativ geringer Dunkelstrom für eine einigermaßen empfindliche Fotodiode erforderlich.

[0016] Wenn eine Durchlaßvorspannung an eine beleuchtete Fotodiode angelegt wird, nimmt die Größe des Sperrstromes ab, wenn der Vorwärtsstrom der Majoritätsträger zunimmt. Gegebenenfalls gleicht der Majoritätsträgerstrom den Fotostrom aus und es fließt kein Nettostrom durch die Diode. Wenn die Durchlaßvorspan-

nung über diesen Punkt erhöht wird, fließt ein Vorwärtsstrom wie in einer normalen Flächendiode, der um den Fotostrom reduziert ist. Somit sind die begrenzenden Werte im Quadranten IV der Strom bei Vorspannung Null und alternativ die Vorwärtsspannung, bei der der Strom Null ist. Der Strom bei Vorspannung Null wird als Kurzschlußstrom bezeichnet und die Spannung bei Nullstrom als Leerlaufspannung. Allgemein gesprochen, wird die Diode bei Vorspannung Betriebscharakteristiken aufweisen, die von der Strom-Spannungs-Kennlinie zwischen der Kurzschluß-Spannung und der Leerlaufspannung abhängen.

[0017] Wie denjenigen bekannt ist, die mit den Beziehungen zwischen Licht und Material vertraut sind, wird die Atom- und Molekularstruktur eines Halbleiter-Materials aufgrund der Beschränkungen der Quantenmechanik die Frequenzen (oder Wellenlängen) des Lichts bestimmen, von dem es abhängig ist oder das es emittiert. Das Ultraviolettgebiet wird normalerweise definiert als elektromagnetische Strahlung, die Wellenlängen zwischen etwa 100 bis 3900 Ångström (Å) (10 bis 390 nm) aufweist. Innerhalb dieses Bereiches werden Wellenlängen zwischen 300 bis 390 nm als "nah"-ultraviolett, Wellenlängen zwischen 200 bis 300 nm als "weit"-ultraviolett und zwischen 10 bis 200 nm als "extrem"-ultraviolett bezeichnet. In Elektronenvolt ausgedrückt liegt der Nah-ultraviolett-Bereich zwischen 3.18 und 4.13 eV, der Weit-ultraviolett-Bereich zwischen 4.13 und 6.20 eV und der Extrem-ultraviolett-Bereich zwischen 6.20 und 124 eV.

[0018] Hinsichtlich der Halbleiter-Materialien muß somit das Licht, das bei der Erzeugung von Trägern absorbiert werden kann, wenigstens eine Energie aufweisen, die so groß ist wie der Bandabstand des Materials. Wie in fast jeder anderen Anwendung in der Halbleiter-Technologie, ist somit der Bandabstand des Materials das grundlegende Charakteristikum zur Bestimmung, ob eine bestimmte Strahlung festgestellt werden kann oder nicht und wie gut dies erfolgen kann. Beispielsweise besitzt Silizium (Si) einen Bandabstand von 1.12 Elektronenvolt (eV) bei 300 Kelvin (K) (näherungsweise Raumtemperatur). Galliumarsenid (GaAs) hat bei derselben Temperatur einen Bandabstand von 1.42 eV, Galliumphosphid (GaP) 2.26 eV, Galliumnitrid (GaN) 3.6 eV, Indiumarsenid (InAs) 0.36 eV und Indiumphosphid (InP) 1.35 eV.

[0019] Insbesondere vom Standpunkt der Strahlungserfassung aus betrachtet werden Photonen Träger in einem Halbleiter-Material erzeugen, wenn diese Photonen eine Energie besitzen, die wenigstens so groß ist wie der Bandabstand des Materials. Beispielsweise werden somit bei der Verwendung von Silizium Photonen mit einer Energie von 1.12 eV oder größer Träger erzeugen. Weil 1.12 eV einer Wellenlänge des Photons von ungefähr 1110 nm (d.h. im Infrarotbereich) entspricht, wird Silizium zur Erfassung von Licht im Infrarot-, sichtbaren und UV-Bereich neigen. Diese Fähigkeit kann unter gewissen Umständen vorteilhaft sein, kann aber entsprechend nicht viel Trennschärfe bieten, wenn das Ziel speziell der Nachweis von UV-Strahlung ist.

[0020] Als weiterer Faktor kommt hinzu, daß die spezielle Empfindlichkeit der Halbleiter-Materialien weiterhin von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig ist. Insbesondere neigen Halbleiter-Materialien dazu, sehr empfindlich auf Photonen anzusprechen, die Wellenlängen mit einer Energie nahe bei dem Bandabstand des Materials aufweisen. In diesem Zusammenhang wird die Wellenlänge des Photons mit der längsten Wellenlänge (niedrigste Frequenz und niedrigste Energie), die in einem Halbleiter Träger erzeugt, manchmal als "Bandrand" bezeichnet, wobei das Material in der Nähe des Bandrandes als äußerst empfindlich gegenüber Licht bezeichnet werden kann.

[0021] Damit solche Materialien wie Si, GaAs, GaP, InAs und InP als UV-Fotodetektoren wirken, muß deshalb ein weiterer Trennfaktor hinzugefügt werden, um die Empfindlichkeit gegenüber Infrarot- und sichtbarem Licht zu reduzieren. Üblicherweise werden geeignete Filter verwendet, die aber mit Nachteilen verbunden sind.

[0022] Es gibt mehrere Eigenschaften, die bei einem Fotodetektor erwünscht sind. Diese schließen Quantenausbeute, Empfindlichkeit, einen geeignet geringen Dunkelstrom, eine geeignet hohe Leerlaufspannung und, wie schon vorher ausgeführt wurde, einen geeigneten Kurzschlußstrom ein.

[0023] Der Begriff der Quantenausbeute wird von denjenigen, die mit dieser Technik vertraut sind, gut verstanden, wobei eine geeignete Abhandlung in SZE, PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES; 2.

[0024] Auflage, John Wiley & Sons, Inc. (1981), Kapitel 13, Seite 743 ff. enthalten ist. Kurz gesagt ist die Quantenausbeute das Verhältnis der Anzahl der erzeugten und festgestellten Träger zu der Anzahl der Photonen, die auf das Bauelement auftreffen. Die Empfindlichkeit einer Fotodiode wird definiert als das Verhältnis des Fotostromes zur optischen Leistung und ist direkt proportional zu der Wellenlänge.

[0025] Die zweite wichtige Eigenschaft ist der Dunkelstrom einer Fotodiode. Da, wie schon vorher festgestellt wurde, eine Fotodiode üblicherweise mit Sperrvorspannung betrieben wird, wobei der Sperrverluststrom durch

die auf das Material einwirkenden Photonen anwächst, werden hohe Verlustströme die Empfindlichkeit von diesen Bauelementen gegenüber verschiedenen Strahlungstypen größtenteils reduzieren oder sogar eliminieren. Dieser Sperrverluststrom in einer Fotodiode wird typischerweise als "Dunkelstrom" bezeichnet, da dieser den Anteil des Stromes reflektiert, der bei Sperrvorspannung fließt, wenn kein Licht auf das Bauelement trifft.

[0026] Wie weiter oben festgestellt wurde, wird eine Diode bei Sperrvorspannung immer einen Dunkelstrom aufweisen. Dieser wird durch Minoritätsträger (d.h. Löcher in n-leitenden Materialien und Elektronen in p-leitenden Materialien) verursacht und dargestellt, die bei Sperrvorspannung den Übergang erreichen. Weiterhin wird die Anzahl der Minoritätsträger, die bei Sperrvorspannung den Übergang erreichen, von der Gesamtzahl der Minoritätsträger abhängen. Beispielsweise kann die Eigenträgerdichte in einem p-leitenden Halbleiter durch die nachfolgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$n_i^2 = p_p n_p$$

wobei n_i^2 die Eigenträgerkonzentration, p_p die Anzahl der Majoritätsträger und n_p die Anzahl der Minoritätsträger für ein p-leitendes Material bezeichnet.

[0027] Es kann weiterhin festgestellt werden, daß der Dunkelstrom direkt proportional zu der Anzahl der Minoritätsträger ist, so daß je größer die Anzahl der Minoritätsträger um so größer der Dunkelstrom und um so niedriger die Empfindlichkeit der Fotodiode ist. Weiterhin hängt die Anzahl der Minoritätsträger von dem Bandabstand des Materials ab. Dies tritt auf, da die Gegenwart von Minoritätsträgern wenigstens teilweise temperaturabhängig ist; d.h. einige Träger steigen als Folge der Wärmeenergie vom Valenzband zum Leitungsband auf. Deshalb wird bei einem Material mit einem kleineren Bandabstand eine größere Anzahl von Trägern bei einer gegebenen Temperatur thermisch erzeugt. Alternativ werden bei einem Material mit einem größeren Bandabstand weniger Minoritätsträger bei einer gegebenen Temperatur erzeugt und somit wird der Sperrdunkelstrom entsprechend niedriger bei einer gegebenen Temperatur.

[0028] Die nächste erwünschte Eigenschaft einer Fotodiode ist ihre Leerlaufspannung. Diese wird wiederum von der Natur des Halbleiters bestimmt; siehe SZE Seite 794, wo dargelegt wird, daß die Leerlaufspannung umgekehrt proportional zu dem Sättigungsstrom der Diode ist, der weiterhin von dem bestimmten Material und deshalb von dessen Bandabstand abhängt. Wegen dieser umgekehrten Proportionalität wird die Leerlaufspannung um so größer je kleiner der Sättigungsstrom der Diode wird.

[0029] Siliziumkarbid, ein IV-IV Verbundhalbleiter, war lange Zeit ein Versuchsmaterial zur Verwendung in der Herstellung von derartigen elektronischen Halbleiterbauelementen gewesen. Siliziumkarbid hat eine Anzahl von Eigenschaften, die es theoretisch für derartige Verwendungen vorteilhaft machen. Diese schließen einen weiten Bandabstand, eine hohe thermische Leitfähigkeit, eine niedrige Dielektrizitätskonstante, eine hohe Sättigungsdriftgeschwindigkeit der Elektronen, einen hohen Durchbruch des elektrischen Feldes, eine geringe Lebensdauer der Minoritätsträger und eine hohe Dissoziationstemperatur ein. Zusammenfassend ergeben diese Eigenschaften, daß ein Halbleiterbauelement, das aus Siliziumkarbid hergestellt ist, bei wesentlich höheren Temperaturen und ebenfalls mit höheren Geschwindigkeiten und höherem Leistungsniveau betreibbar sein sollte, als Bauelemente, die aus anderen Halbleitern hergestellt sind.

[0030] Als ein Versuchsmaterial für eine Fotodiode hat 6H-mehrleitendes Siliziumkarbid einen Bandabstand von 2.92 eV bei 300K. Deshalb wird Licht mit einer Wellenlänge von etwa 424 nm oder größer keine Träger in 6H-Siliziumkarbid erzeugen. Somit wird 6H-Siliziumkarbid vorteilhaft durch Licht mit Wellenlängen länger als etwa 424 nm nicht beeinflusst. Deshalb spricht 6H-Siliziumkarbid nur im blauen, violetten und ultravioletten Bereich des Spektrums an, d.h. das hohe Energieende des sichtbaren Spektrums und das meiste des UV-Spektrums.

[0031] Da weiterhin der Bandrand von 6H-Siliziumkarbid bei etwa 424 nm liegt, hat es gegenüber Wellenlängen im UV-Bereich eine wesentlich höhere Empfindlichkeit, eine Spitzenempfindlichkeit von etwa 270 nm und spricht nur in einem relativ kleinen Bereich der Wellenlänge innerhalb des sichtbaren Spektrums an.

[0032] Wiederum im Vergleich, wird die Leerlaufspannung einer Siliziumfotodiode im Betrieb bei etwa 0.47 V liegen, während bei einer 6H-Siliziumdiode die Leerlaufspannung näherungsweise 2.3 V beträgt.

[0033] Hinsichtlich der Minoritätsträgerkonzentration beschreibt das nachfolgende Beispiel die Vorteile von Siliziumkarbid. Für Silizium beträgt n_i näherungsweise 10^{10} cm^{-3} , während für 6H-Siliziumkarbid n_i näherungs-

weise bei 10^{-5} cm^{-3} liegt; d.h. 15 Größenordnungen. Als ein angenommenes Beispiel wird deshalb für eine p-leitende Probe von Siliziumkarbid mit einer typischen Dotierungsstärke von ungefähr 10^{17} cm^{-3} die Anzahl der Minoritätsträger (Elektronen) dadurch erhalten, daß das Quadrat der Eigenträgerkonzentration durch die Konzentration des p-leitenden Trägers dividiert wird, d.h.:

$$n_p = n_i^2 / p_p$$

[0034] Wenn diese Gleichung für Silizium ausgeführt wird, beträgt die Minoritätsträgerkonzentration 10^3 cm^{-3} . Für Siliziumkarbid ausgeführt führt die wesentlich geringere Eigenträgerkonzentration zu einer entsprechend weit niedrigeren Minoritätsträgerkonzentration von 10^{-27} cm^{-3} , d.h. 24 Größenordnungen niedriger.

[0035] Dies bedeutet, daß die Anzahl von Eigenminoritätsträgern in Siliziumkarbid extrem niedrig ist und diese geringeren Träger entsprechend zu einem sehr kleinen Dunkelstrom führen. Neben den anderen bereits erwähnten Vorteilen läßt dieser im großen Umfang die Empfindlichkeit einer Siliziumkarbidfotodiode verglichen mit einer Siliziumfotodiode anwachsen.

[0036] Nichtsdestoweniger muß für Fotodioden und andere aus Siliziumkarbid hergestellte Halbleiterbauelemente noch die Bewährung unter anderen Umständen als den Laborbereich erbracht werden und weiterhin müssen diese ihr kommerzielles Potential erreichen. Dieser Mangel an Erfolgsergebnissen rührt zumindest teilweise von der Schwierigkeit her, auf die man beim Arbeiten mit Siliziumkarbid stößt. Es ist ein extrem hartes Material, das oft als Schleifmittel verwendet wird. Es muß oft bei extrem hohen Temperaturen bearbeitet werden, bei denen andere Materialien nicht bearbeitet werden können, und kristallisiert, betrachtet von einem Halbleiterstandpunkt, in weit über 150 Typen, von denen viele sich lediglich durch geringe thermodynamische Unterschiede unterscheiden. Aus diesen letztgenannten Gründen ist die Produktion von monokristallinen Dünnschichten aus Siliziumkarbid, die für bestimmte Bauelemente notwendig sind, und die Produktion von großen Einzelkristallen aus Siliziumkarbid, die als Substratmaterial und für andere Anwendungen verwendbar sind, ein schwer zu erreichendes Ziel geblieben. Weiterhin haben sich bestimmte Dotierungstechniken, die erfolgreich für andere Materialien entwickelt wurden, als erfolglos erwiesen, wenn sie in Verbindung mit Siliziumkarbid eingesetzt wurden. Beispielsweise ist der gerade diskutierte niedrige Dunkelstrom theoretisch für Siliziumkarbid möglich aber bedeutungslos beim Fehlen von einem guten Übergang. Dies wird durch Mißerfolge belegt, die in bekannten Druckschriften festgehalten sind.

Stand der Technik

[0037] Bis zum heutigen Datum sind verschiedene Bemühungen erfolgt, derartige Detektoren mit Siliziumkarbid zu erzeugen. Ein früher Versuch wird in den US-Patentschriften US 3,504,181 und US 3,563,817 von Chang und Campbell und in ihrer korrespondierenden Veröffentlichung beschrieben, "DETECTION OF ULTRAVIOLETT RADIATION USING SILICON CARBIDE P-N JUNCTIONS", Solid State Electronics, Vol. 10, Seiten 949 bis 953 (1967). Chang und Campbell beschreiben Bemühungen zur Produktion von aus Festkörper-Siliziumkarbid aufgebauten UV-Strahlungsdetektoreinheiten, bei denen der erforderliche p-n-Übergang durch Diffusion von Aluminium oder einem anderen geeigneten Dotierungsmaterial in einen n-leitenden Kristall aus Siliziumkarbid erzeugt wird, um die erforderlichen angrenzenden p-n-Bereiche und den Übergang dazwischen herzustellen. Wie denen bekannt ist, die mit Halbleiterbauelementen und insbesondere mit Siliziumkarbid vertraut sind, sind jedoch diffundierte Übergänge in das massive Substrat bekannt für ihre charakteristische Inkonsistenz und für ihren Mangel an guten elektronischen Eigenschaften. Beispielsweise ist der Dunkelstrom, von dem in Chang's '181 Patent berichtet wird, trotz der überwältigenden statistischen und theoretischen Vorteile von Siliziumkarbid schlechter als dies normalerweise von einem typischen Siliziumbauelement erwartet wird. Das Bauelement von Chang liefert eine sehr niedrige Ausgangsspannung, wie Fig. 16 und die Beschreibung Spalte 9, Zeilen 11 bis 13 zeigen.

[0038] Weiterhin wird dieses Problem in einer Veröffentlichung von Glasow, et al angesprochen, SIC-UV-PHOTODETECTORS, SPIE, vol. 868, Opto Electronic Technologies For Remote Sensing From Space (1987), Seiten 40 bis 45. Glasow und seine Ko-Autoren führen aus, daß die Bauelemente von Chang und Campbell durch strukturelle Zersetzung der Oberflächenschichten während des Dotierungsprozesses gekennzeichnet waren. In einem Versuch, die Bauelemente von Chang und Campbell zu verbessern, verwendeten Glasow et al ein Siliziumkarbidsubstrat, eine p-leitende Epitaxialschicht aus Siliziumkarbid auf diesem Substrat und eine implantierte Mulde aus n-leitendem Siliziumkarbid, die durch Ionenimplantation von Stickstoff gebildet wurde. Die resultierenden Bauelemente zeigten jedoch hohe Verlustströme in Sperrvorspannung (Fig. 3, Seite 42), die den Mißerfolg anzeigen, einen guten Übergang herzustellen.

[0039] Die hohen Verlustströme von diesen bekannten Bauelementen reduzieren zunächst die Ausgangsspannung und somit die Ausgangsleistung von den Bauelementen. Weil die Quantenausbeute auf dem Ausgangsstrom basierend berechnet wird, bleiben die Werte für die Quantenausbeute bei den bekannten Bauelementen trügerisch hoch, obwohl die Bauelemente verlustbehaftet sind.

[0040] Neuerdings sind jedoch eine Anzahl von Entwicklungen erfolgt, die sowohl das Einkristallmaterial als auch das Dünnschichtwachstum von Siliziumkarbid erfolgreich verwirklicht haben. Diese Entwicklungen sind in verschiedenen Patenten enthalten, die von dem Anmelder der vorliegenden Erfindung entweder eingereicht oder für diesen ausschließlich lizenziert sind, und deren Inhalt hier vollständig durch Bezugnahme eingebracht wird. Diese schließen ein: US 4,912,063, Davis et al, "Growth of Heta-SiC Thin Films and Semiconductor Devices Fabricated Thereon"; US 4,912,064, Davis et al, "Homoepitaxial Growth of Alpha-SiC Thin Films and Semiconductor Devices Fabricated Thereon"; US 4,865,685, Palmour, "Dry Etching of Silicon Carbide"; US 4,866,005, Davis et al, "Sublimation of Silicon Carbide to Produce Large, Device Quality Single Crystals of Silicon Carbide" und die anhängige US-Anmeldung Nr. 07/356,333, eingereicht am 24. Mai 1989, "Implantation and Electrical Activation of Dopants into Monocrystalline Silicon Carbide", die als US 5,087,576 am 11. Februar 1992 erteilt wurde.

Aufgabenstellung

[0041] Ausgehend hiervon liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, einen in Siliziumkarbid eingebrachten UV-Strahlungsdetektor zu schaffen, der in praktischer Weise die theoretischen Vorteile von Siliziumkarbid aufzeigt und insbesondere durch einen exzellenten Übergang und einen extrem kleinen Dunkelstrom gekennzeichnet ist, wodurch eine gute Quantenausbeute und eine gute Ausgangsleistung erreicht wird.

[0042] Diese Aufgabe wird durch einen UV-Strahlungsdetektor mit den Merkmalen der Patentansprüche 1, 7, 8 oder 12 gelöst. Die Erfindung liegt in einem in Siliziumkarbid eingebrachten UV-Strahlungsdetektor, der aus einem Einkristallsubstrat aus Siliziumkarbid hergestellt ist, einer ersten Epitaxialschicht aus Siliziumkarbid auf dem Substrat und einer oberen Epitaxialschicht aus Siliziumkarbid auf der ersten Epitaxialschicht. Die erste und die oberen Epitaxialschichten haben entgegengesetzte Leitfähigkeitstypen und bilden zwischenliegend einen Übergang. Die erste Schicht hat eine ausreichend niedrigere Trägerkonzentration als die Trägerkonzentration der oberen Schicht, so daß das Verarmungsgebiet des p-n-Übergangs vorherrschend in der ersten Schicht bei Gleichgewicht vorliegt. Die erste Schicht hat weiterhin eine Stärke, die groß genug ist um das Verarmungsgebiet zu unterstützen und die größer als die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der ersten Schicht ist, so daß Photonen, die die erste Schicht erreichen, vorherrschend vor dem Erreichen des Substrates hierin absorbiert werden und sodann die korrespondierenden Träger, die in der ersten Schicht erzeugt werden, innerhalb ihrer Lebenszeit in das Verarmungsgebiet diffundieren. Die obere Epitaxialschicht hat eine definierte Stärke, die eine geringere Stärke als die erste Schicht aufweist und die größer als das Verarmungsgebiet bei Nullvorspannung innerhalb der oberen Schicht ist, die aber klein genug ist, um die Absorption von UV-Strahlung zu vermeiden. Die obere Schicht ist weiterhin dünn genug, so daß die Strahlung im UV-Bereich vorherrschend im Verarmungsgebiet des p-n-Überganges Träger erzeugt. Die erfindungsgemäße Fotodiode hat einen extrem kleinen Dunkelstrom bei Sperrvorspannung.

Ausführungsbeispiel

[0043] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus in der Zeichnung in schematischer Weise dargestellten erfindungsgemäßen Ausführungsformen und der nachfolgenden Beschreibung. Es zeigen:

[0044] **Fig. 1** einen Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen Fotodetektor;

[0045] **Fig. 2** einen Querschnitt durch eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fotodetektors;

[0046] **Fig. 3** ein Plotterdiagramm, aus dem die Empfindlichkeit des erfindungsgemäßen Fotodetektors hervorgeht;

[0047] **Fig. 4** ein Diagramm mit einem Vergleich der Dunkelstromdichte bei einer Sperrvorspannung von -10 V für erfindungsgemäße Fotodioden verglichen mit der Dunkelstromdichte bei einer Sperrvorspannung von -10 V für Siliziumkarbidfotodioden, die vor der vorliegenden Erfindung entwickelt wurden, bei verschiedenen Temperaturen;

[0048] **Fig. 5** ein Diagramm mit einem Vergleich des Dunkelstromes bei einer Sperrvorspannung von -1.0 V für Siliziumfotodioden und Siliziumkarbidfotodioden bei verschiedenen Temperaturen;

[0049] **Fig. 6** ein Diagramm für die Dunkelstromdichte bei einer Sperrvorspannung von -1.0 V für Siliziumkarbidfotodioden bei verschiedenen Temperaturen;

[0050] **Fig. 7** ein Diagramm des primären Betriebsgebietes der erfindungsgemäßen Fotodiode, das begrenzt ist von der Leerlaufspannung und dem Kurzschlußstrom und die

[0051] **Fig. 8 bis Fig. 11** Querschnittansichten von weiteren Ausführungsformen von erfindungsgemäßen Fotodioden.

[0052] Die vorliegende Erfindung betrifft einen in Siliziumkarbid gebildeten UV-Strahlungsdetektor, von dem eine erste Ausführungsform als Fotodiode **10** in **Fig. 1** gezeigt ist. Die Fotodiode **10** wird mit einem Einkristallsubstrat **11** aus Siliziumkarbid gebildet, das einen ersten Leitfähigkeitstyp aufweist. Auf dem Substrat **11** ist eine erste Epitaxialschicht **12** aus Siliziumkarbid aufgebracht, die dieselbe Leitfähigkeit wie das Substrat aufweist. Eine obere Epitaxialschicht **13** aus Siliziumkarbid ist auf der ersten Epitaxialschicht **12** vorgesehen, die der einfallenden elektromagnetischen Strahlung ausgesetzt wird. Die oberste Schicht **13** hat gegenüber der ersten Schicht und dem Substrat eine entgegengesetzte Leitfähigkeit. Die erste Epitaxialschicht **12** und die oberste Epitaxialschicht **13** bilden einen zwischenliegenden p-n-Übergang **14**. An der obersten Schicht **13** und dem Substrat **11** sind jeweils ohmsche Kontakte **15** und **16** vorgesehen.

[0053] Die Trägerkonzentrationen der Schichten **12** und **13** sind voneinander verschieden. Insbesondere hat die erste Schicht **12** eine Trägerkonzentration, die ausreichend niedriger ist als die Trägerkonzentration der obersten Schicht **13**, so daß das Verarmungsgebiet des p-n-Überganges **14** sich vorherrschend in der ersten Schicht **12** im Gleichgewicht befindet, d.h. bei Vorspannung Null. Bei bevorzugten Ausführungsformen liegt der spezifische Widerstand des Substrates zwischen etwa 0.02 und 10 Ohm-cm, die Trägerkonzentration der ersten Schicht **12** liegt zwischen 0.1 und $10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, und die der obersten Schicht **13** zwischen 5 und $20 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

[0054] Weiterhin weist die erste Schicht **12** eine definierte Stärke bzw. Dicke auf, die ausreichend genug ist, um das Verarmungsgebiet zu unterstützen und die größer ist als die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der ersten Schicht. Auf diese Weise werden die Elektronenlochpaare, die durch in der ersten Schicht absorbierten Photonen erzeugt werden, innerhalb ihrer Trägerlebenszeit in das Verarmungsgebiet des Überganges diffundieren. Weiterhin sollte die Trägerkonzentration der obersten Schicht **13** groß genug sein, um den Serien- und Schichtwiderstand wesentlich zu reduzieren.

[0055] Die oberste Epitaxialschicht **13** hat eine definierte Stärke, die geringer ist als die Stärke der ersten Schicht **12** und die größer ist als die Breite bzw. Dicke der Verarmungsschicht bei Vorspannung Null in der obersten Schicht, und die klein genug ist, um im wesentlichen die Absorption von UV-Strahlung zu vermeiden, so daß die Strahlung im ultravioletten Bereich vorherrschend in dem Verarmungsgebiet des p-n-Überganges **14** Träger erzeugt.

[0056] Obwohl die wichtigsten Eigenschaften für die Stärke der ersten Schicht **12** und der obersten Schicht **13** ihre funktionalen Merkmale sind, hat es sich bei der vorliegenden Erfindung gezeigt, daß eine Stärke von nicht mehr als 300 nm für die oberste Schicht **13** und eine Stärke zwischen etwa 2 bis 5 Mikrometer für die erste Schicht **12** geeignet ist.

[0057] Bei einer ersten Ausführungsform der Erfindung besitzt das Substrat eine p-leitende Leitfähigkeit, die erste Epitaxialschicht ebenfalls eine p-leitende Leitfähigkeit und die oberste Epitaxialschicht weist eine n-leitende Leitfähigkeit auf. Bei dieser Ausführungsform besteht der ohmsche Kontakt der obersten Epitaxialschicht **13** aus Nickel und der ohmsche Kontakt des Substrates besteht entweder aus Aluminium oder einer Aluminiumlegierung.

[0058] Dieser bevorzugte Aufbau bietet mehrere Vorteile. Zunächst bringt die Verwendung einer n-leitenden obersten Schicht eine höhere Leitfähigkeit und ein niedrigeres Absorptionsmaß als eine p-leitende Schicht. Dies rührt von einer niedrigeren Aktivierungsenergie für n-leitende Träger im Siliziumkarbid her als für p-leitende Träger. Mit anderen Worten wird eine geringere Anzahl von n-leitenden Dotierungsatomen die gleiche Leitfähigkeit erzeugen wie eine größere Anzahl von p-leitenden Dotierungsatomen. Weiterhin bedeutet dies, daß eine gleiche Leitfähigkeit mit weniger Dotierungsatomen erreicht werden kann oder eine größere Leitfähigkeit

mit einer gleichen Anzahl von Dotierungsatomen. Größere Leitfähigkeit verbessert die elektronischen Eigenschaften des resultierenden Bauelementes, während weniger Dotierungsatome seine optischen Fähigkeiten steigert.

[0059] Es sei jedoch angemerkt, daß eine geeignete Fotodiode ebenfalls mit einem Substrat von n-leitender Leitfähigkeit gebildet werden kann, wobei die erste Schicht n-leitende Leitfähigkeit und die oberste Epitaxialschicht p-leitende Leitfähigkeit aufweist.

[0060] Bei dieser Ausführungsform enthält der ohmsche Kontakt 15 der obersten Epitaxialschicht 13 Aluminium oder eine Aluminiumverbindung und der ohmsche Kontakt 16 des Substrates 11 besteht aus Nickel.

[0061] Als ein weiterer Vorteil ist bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Stärke der obersten Epitaxialschicht 13 ausreichend größer als die Stärke des ohmschen Kontaktes 15, um eine Kurzschlußbildung des ohmschen Kontaktes durch die oberste Epitaxialschicht 13 zu der daneben liegenden ersten Epitaxialschicht 12 zu vermeiden. Diese Stärke kann als Verhältnis ausgedrückt werden, wobei vorzugsweise das Verhältnis der Stärke der obersten Epitaxialschicht 13 zu der Stärke des ohmschen Kontaktes 15 wenigstens etwa 4:1 und vorzugsweise zwischen etwa 4:1 und 6:1 liegt. Bei bevorzugten Ausführungsformen sollte, wenn die oberste Schicht eine Stärke von etwa 300 nm (3000 Å), der ohmsche Kontakt auf eine Stärke von nicht mehr als etwa 75 nm (750 Å) begrenzt sein und vorzugsweise zwischen 50 und 75 nm (500 bis 750 Å) betragen.

[0062] Bei bevorzugten Ausführungsformen wird das Substrat 11, die erste Epitaxialschicht 12 und die oberste Epitaxialschicht 13 aus demselben Polykristall aus Siliziumkarbid gebildet. Bevorzugte Polykristalle werden aus einer Gruppe ausgewählt, die 6H-, 4H-, 2H-, 15R- und 3C- Polykristalle aus Siliziumkarbid enthält.

[0063] Falls erwünscht, kann eine antireflektierende Beschichtung 17 auf die oberste Schicht 13 aufgebracht werden, wobei bei sehr bevorzugten Ausführungsformen diese Siliziumdioxid und Aluminiumoxid enthält.

[0064] Falls weiterhin erwünscht, kann die erfindungsgemäße Fotodiode in Verbindung mit einem solarblinden Abdeckfilter verwendet werden. Derartige Filter werden üblicherweise aus einer Vielzahl von wechselnden Schichten aus Siliziumdioxid (SiO_2) und Siliziumnitrid (Si_3N_4) gebildet und sind im allgemeinen für UV-Fotodetektoren aller Typen erhältlich. Ein geeignetes Filter kann somit ausgewählt und bei der vorliegenden Erfindung ohne größere Erprobung eingesetzt werden. Das Filter verhindert, daß einfallendes Licht von Wellenlängen größer als etwa 290 nm die oberste Schicht erreichen.

[0065] Eine der auffallenden Eigenschaften der bevorzugten erfindungsgemäßen Ausführungsform ist die hohe Qualität des Übergangs, die dadurch möglich wurde, daß der Übergang zwischen den Epitaxialschichten besser als ein Diffusionsgebiet in einem Substrat ausgebildet ist. Der Übergang von hoher Qualität wird entsprechend den Lehren der US-Patente US 4,912,063 und US 4,912,064 gebildet, deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme vollständig eingebracht wird. Der Anmelder der vorliegenden Erfindung ist der ausschließliche Lizenznehmer von beiden dieser Patente. Insbesondere offenbart das US-Patent US 4,912,064 ein Verfahren zur Bildung von Epitaxialschichten aus Alpha-Siliziumkarbid auf Substraten aus Alpha-Siliziumkarbid, bei dem das Substrat eine ebene Grenzschichtoberfläche hat, die mit mehr als einem Grad bezüglich einer Basisebene im wesentlichen gegen eine der $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Richtungen ansteigt, wobei die erste Epitaxialschicht 12 Alpha-Siliziumkarbid enthält, das homoepitaxial auf der Grenzschichtoberfläche des Substrates aufgebracht ist.

[0066] Alternativ kann das Substrat 6H-Alpha-Siliziumkarbid und die erste Epitaxialschicht Beta (3C)-Siliziumkarbid auf dem Substrat aufweisen. Bei dieser Ausführungsform ist das Beta-Siliziumkarbid epitaxial in der [111] Wachstumsrichtung auf der (0001) Siliziumseite des 6H-Siliziumkarbidsubstrates aufgebracht, so daß sich der (111) Kristallbau des Dünnschichtes aus Beta-Siliziumkarbid dem (0001) Kristallbau des Substrates aus 6H-Siliziumkarbid anpaßt und so daß die Beta-Siliziumkarbid (10 $\bar{1}$) Seite parallel zur 6H-Siliziumkarbid (11 $\bar{2}0$) Seite ist und die Beta-Siliziumkarbid (111) Seite parallel zu der 6H-Siliziumkarbid (0001) Seite liegt.

[0067] Fig. 3 zeigt die Empfindlichkeit von erfindungsgemäßen Fotodioden, die als Milliampere pro Watt über der Wellenlänge (nm) aufgetragen ist. Fig. 3 zeigt, daß die Fotodetektoren gemäß der vorliegenden Erfindung eine Spitzenempfindlichkeit bei etwa 270 nm besitzen, was für viele Anwendungen eine ideale Lage innerhalb des UV-Bereiches darstellt, und daß ein Großteil ihrer Empfindlichkeit zwischen 220 und 320 nm liegt, was wiederum ein ziemlich nützlicher Bereich innerhalb des UV-Gebietes ist. Ebenfalls zeigt die Diode gute Quantenausbeute innerhalb dieses Empfindlichkeitsbereiches.

[0068] **Fig. 4** zeigt einen Vergleich zwischen im Stand der Technik bekannten Siliziumkarbidioden und erfindungsgemäßen Fotodioden. Dioden gemäß dem Verfahren von Glasow sind in der oberen Linie in **Fig. 4** gezeigt, während Dioden gemäß der vorliegenden Erfindung durch die untere Linie dargestellt sind. Wie hieraus hervorgeht, ist bei einer gegebenen Betriebstemperatur der Dunkelstrom bei erfindungsgemäßen Dioden wenigstens zwei oder mehr Größenordnungen kleiner als der Dunkelstrom bei den bekannten Dioden. Diese Werte sind ebenfalls in Tabelle 1 für ein Bauelement mit einer aktiven Fläche von 0.04 cm² und einer Sperrvorspannung von -1.0 V aufgeführt. In Tabelle 1 wird der Dunkelstrom mit Femtoampere (10⁻¹⁵ Ampere) und die Temperatur in Zentigrad angegeben.

Tabelle 1

	Dunkelstrom	Temperatur
1	15	60
2	33	70
3	70	80
4	163	90
5	289	100
6	584	110
7	1097	120
8	2090	130
9	3990	140
10	7610	150
11	14,780	160
12	29,610	170

[0069] Wie schon vorher ausgeführt wurde und wie denjenigen, die mit dem Betrieb von Fotodioden vertraut sind bekannt ist, läßt die Verkleinerung des Diodendunkelstromes die Empfindlichkeit der Fotodiode in großem Umfang anwachsen. Weiterhin ist, obwohl die Quantenausbeute genauso groß wie bei den bekannten Dioden erscheinen mag, die Quantenausbeute direkt proportional mit dem Kurzschlußfotostrom, der eher als die Ausgangsspannung erzeugt wird, und die bei den bekannten Dioden trügerisch hoch erscheint, obwohl deren Ausgangsspannungen wegen deren relativ großen Dunkelströmen sehr schwach ist.

[0070] **Fig. 5** zeigt ein Vergleichsdiagramm von Siliziumfotodioden mit erfindungsgemäßen Fotodioden aus Siliziumkarbid. Alle Dioden weisen eine Fläche von 4 mm² auf. Die Eigenschaften von Siliziumdioden sind typisch, wobei in diesem Fall VTB Prozeßfotodioden der Modelle VTB 9412, 9413, 9414, 9415 und 9416 von EG & G Vactec, St. Louis, zum Einsatz kommen. Wie in **Fig. 5** gezeigt ist, liegt der Dunkelstrom von erfindungsgemäßen Siliziumkarbidfotodioden immer wenigstens fünf Größenordnungen niedriger als der von Siliziumfotodioden.

[0071] **Fig. 6** zeigt die Eigenschaften von erfindungsgemäßen Siliziumkarbidfotodioden ausgedrückt als Dunkelstromdichte, die über der reziproken Temperatur aufgetragen ist. **Fig. 6** zeigt, daß erfindungsgemäße Fotodioden eine Dunkelstromdichte von etwa 10^{-8} Ampere/cm² bei einer Temperatur von etwa 500 K (etwa 227°C) haben, und die bei einer Temperatur von etwa 300 K (etwa 27°C), d.h. etwa Raumtemperatur, zu einer Stromdichte von etwa 10^{-14} Ampere/cm² abnimmt.

[0072] **Fig. 7** zeigt ein repräsentatives Diagramm des Fotostromes in Abhängigkeit von der Fotospannung für erfindungsgemäße Fotodioden. **Fig. 7** zeigt exemplarische Werte für eine Fotodiode mit einer Bauelementfläche von 0.09 Quadratzentimetern (cm²), die bei etwa 7×10^{-3} Watt/cm² bei Wellenlängen zwischen etwa 200 und 350 nm beleuchtet wurde. Wie hieraus hervorgeht liegt der Kurzschlußstrom (I_{sc}) bei 0.475 Milliampere (mA) und die Kurzschlußspannung (V_{oc}) bei 2.28 Volt (V). Das schraffierte Rechteck stellt das Gebiet mit maximaler Ausgangsleistung dar und zeigt, daß der Maximalstrom bei maximaler Leistung (I_m) bei näherungsweise 0.35 mA und die Maximalspannung bei Maximalleistung (V_m) bei 1.35 V liegt.

[0073] Diese und weitere Eigenschaften sind ebenfalls in Tabelle 2 zusammengefaßt

Tabelle 2

Wirksame Fläche (mm ²)	Empfindlichkeit (mA/W)	Spektralempfindlichkeit (µA/(W/cm ²))	Dunkelstrom (pA bei -1V)	Übergangskapazität (nF bei 0V)	Leerlaufspannung (V)
1	140 - 150	1500	0.001	0.160	2.35
4	140 - 150	6000	0.002	0.460	2.35
9	140 - 150	13500	0.005	0.640	2.35

[0074] Eine zweite Ausführungsform der Erfindung wird in **Fig. 2** gezeigt, wobei die Fotodiode insgesamt mit 20 bezeichnet wird. Im allgemeinen entspricht diese Ausführungsform der Ausführungsform gemäß **Fig. 1** mit der Ausnahme, daß das Substrat aus einem Festkörper-Einkristall 21 mit einer weiteren hierauf vorgesehenen Epitaxialschicht 22 besteht. Die Epitaxialschicht 22 ist ebenso wie die erste Epitaxialschicht 23 vom ersten Leitfähigkeitstyp, während das Festkörper-Substrat 21 eine entgegengesetzte Leitfähigkeit, die eher identisch mit dem Leitfähigkeitstyp der in **Fig. 1** dargestellten Diode ist. Weiterhin hat die erste Epitaxialschicht 23 dieselbe Leitfähigkeit wie die hinzukommende Epitaxialschicht 22, wobei die Trägerkonzentration im allgemeinen weniger als die der hinzukommenden Epitaxialschicht 22 beträgt.

[0075] Die Leitfähigkeit der weiteren Schicht 22 ist ausreichend hoch, um den Kontaktwiderstand zu minimieren, und ebenfalls ist ihre Stärke ausreichend, um den Flächenwiderstand zu minimieren. In bevorzugten Ausführungsformen weist die Schicht 22 eine Trägerkonzentration zwischen etwa 5 und 20×10^{18} cm⁻³ und eine Stärke zwischen etwa 10 und 20 Mikrometern auf.

[0076] Die oberste Schicht ist mit 24 bezeichnet und hat wie bei der ersten Ausführungsform eine Trägerkonzentration, die ausreichend größer ist als die Trägerkonzentration der ersten Schicht 23, so daß das Verarmungsgebiet bei Gleichgewicht oder Nullvorspannung sich vorherrschend in der ersten Schicht 23 ausbildet.

[0077] Die erste Schicht 23 und die oberste Schicht 24 bilden einen zwischenliegenden p-n-Übergang 25. Jeweilige ohmsche Kontakte 26 und 27 sind an der obersten Schicht 24 und an der weiteren Epitaxialschicht 22 vorgesehen. Durch die Positionierung der ohmschen Kontakte auf der weiteren Epitaxialschicht 22 werden, im Gegensatz zu einer Positionierung auf dem Substrat 21, zwei Ziele erreicht. Zum einen wird ein Bauelement geschaffen, bei dem beide Kontakte auf derselben Oberseite (horizontale Geometrie) im Gegensatz zu entge-

gegengesetzten Oberseiten (vertikale Geometrie) angeordnet sind. Zum anderen wird das Übergangsverhalten an der Grenze zwischen dem Substrat 21 und der weiteren Epitaxialschicht 22 vermieden. Falls erwünscht, kann ein weiterer ohmscher Kontakt 29 dem Substrat 21 hinzugefügt werden, um das Bauelement zu erden, falls dies erwünscht oder notwendig ist. Wie bei der ersten Ausführungsform kann eine antireflektierende Beschichtung 28 der Fotodiode zugefügt werden. Die Fotodiode 20, die in Fig. 2 gezeigt ist, weist ebenfalls die funktionalen Eigenschaften der Diode 10 gemäß Fig. 1 auf, insbesondere die festgelegte Stärke der ersten Schicht 23 und der obersten Schicht 24.

[0078] Wie weiterhin mit Bezug auf die erste Ausführungsform 10 ausgeführt wird, beträgt bei bevorzugten Ausführungsformen die Stärke 23 der obersten Schicht 24 der zweiten Ausführungsform 20 nicht mehr als etwa 300 nm, während die bevorzugte Stärke der zweiten Schicht 23 zwischen etwa 2 und 5 Mikrometern liegt.

[0079] Die Fig. 8 bis Fig. 11 zeigen andere Ausführungsformen der Erfindung. Fig. 8 zeigt eine erfindungsgemäße Fotodiode, die insgesamt mit 30 bezeichnet ist. Bei dieser Ausführungsform besitzt die Fotodiode ein Substrat 31 aus Siliziumkarbid, das einen ersten Leitfähigkeitstyp und eine Epitaxialschicht 32 auf dem Substrat 31 aufweist. Die Epitaxialschicht 32 hat denselben Leitfähigkeitstyp wie das Substrat 31 und bei einer bevorzugten Ausführungsform besitzen beide p-leitende Leitfähigkeit, wobei das Substrat den spezifischen Widerstand und die Epitaxialschicht 32 die Trägerkonzentration aufweist, die bereits vorstehend erläutert wurde. Anstatt einer zweiten Epitaxialschicht wird jedoch der p-n-Übergang durch eine implantierte Mulde 33 aus n-leitendem Siliziumkarbid gebildet. Bei bevorzugten Ausführungsformen wird die Mulde 33 durch einen Hochtemperaturimplantationsprozeß geschaffen, der in der US-Patentschrift 50 87 576 A dargelegt ist, auf die hier bereits vorher verwiesen wurde. Diese Technik hat den Vorteil der Bildung einer aus Fig. 8 hervorgehenden Planargeometrie, wo dies notwendig oder üblich ist. Wie bereits in der US-Patentschrift 50 87 576 A dargelegt wird, werden bei der bei Hochtemperatur ausgeführten Ionenimplantationstechnik Dotierungsatome sowohl implantiert als auch aktiviert, was geringere Beschädigungen als frühere Implantationsbemühungen bei Siliziumkarbid zur Folge hat, wodurch wesentlich bessere elektronische Eigenschaften erhalten werden.

[0080] Wie bei den anderen Ausführungsformen kann eine geeignete antireflektierende Beschichtung 34 der Struktur hinzugefügt werden, wobei die jeweiligen ohmschen Kontakte 35 für das Substrat und 36 für die Mulde die elektronische Struktur dieser Ausführungsform vervollständigen.

[0081] Eine weitere Ausführungsform ist in Fig. 9 gezeigt, bei der die Fotodiode allgemein mit 40 bezeichnet wird. Diese Ausführungsform enthält ein Substrat 41, das einen ersten Leitfähigkeitstyp aufweist, und weiterhin benachbarte Epitaxialschichten 42 und 43, die jeweils denselben Leitfähigkeitstyp besitzen, der entgegengesetzt zum Leitfähigkeitstyp des Substrates 41 ist. Wie bei der Ausführungsform gemäß Fig. 8 wird der p-n-Übergang durch Implantation einer Mulde 44 in die oberste Epitaxialschicht 43 gebildet, so daß der p-n-Übergang zwischen der Mulde 44 und der Epitaxialschicht 43 liegt. Um eine Vorspannung auf den p-n-Übergang aufzubringen, sind ohmsche Kontakte 45 an der Epitaxialschicht 42 und ohmsche Kontakte 46 an der Mulde 44 vorgesehen. Falls erwünscht kann ein weiterer ohmscher Kontakt 47 dem Substrat 41 hinzugefügt werden, um das Bauelement, falls dies erwünscht oder notwendig ist, zu erden. Bei dieser Ausführungsform ist bei einer bevorzugten Ausgestaltung das Substrat 41 n-leitend, die erste Epitaxialschicht 42 eine hochbesetzte p-leitende Schicht ($5\text{-}20\text{E}18$), die zweite Epitaxialschicht 43 eine weniger besetzte p-leitende Schicht ($0.1\text{-}10\text{E}17$) und die Mulde ein höher besetztes n-leitendes Gebiet ($5\text{-}20\text{E}18$).

[0082] Fig. 10 zeigt noch eine andere Ausführungsform, die allgemein mit dem Bezugszeichen 50 bezeichnet ist. Diese Ausführungsform enthält ebenfalls ein Substrat 51 und eine erste Epitaxialschicht 52 auf dem Substrat 51. Sowohl das Substrat 51 als auch die Epitaxialschicht 52 sind aus Siliziumkarbid gebildet, das denselben Leitfähigkeitstyp aufweist. Ein p-n-Übergang wird bei diesem Bauelement durch Implantation des gesamten oberen Bereiches der Epitaxialschicht 52 geschaffen, um eine implantierte Schicht 53 von entgegengesetzter Leitfähigkeit zu bilden, so daß zwischen dem Bereich 53 und der Epitaxialschicht 52 ein p-n-Übergang geschaffen wird. Wie bei den anderen Ausführungsformen kann eine antireflektierende Beschichtung 54 dem Bauelement hinzugefügt werden, wobei jeweils ohmsche Kontakte 55 für den implantierten Bereich 53 und 56 für das Substrat 51 die elektronische Struktur des Bauelements vervollständigen. Wie bei den anderen Ausführungsformen kann jede der jeweiligen Schichten aus p- oder n-leitendem Siliziumkarbid bestehen, was von der gewünschten Anordnung abhängt, aber bei bevorzugten Ausführungsformen ist das Substrat 51 p-leitend, die Epitaxialschicht ist vom weniger hoch besetzten p-Typ und die implantierte Bereich 53 ist vom höher besetzten n-Typ.

[0083] Fig. 11 zeigt noch eine andere Ausführungsform, die insgesamt mit 60 bezeichnet wird. Diese Ausführungsform ist analog zu der Ausführungsform gemäß Fig. 2 mit dem Unterschied, daß die oberste Schicht eine

implantierte Schicht im Gegensatz zu einer Epitaxialschicht ist. Die Fotodiode 60 enthält ein Substrat 61, eine weitere Epitaxialschicht 62, eine erste Epitaxialschicht 63 und die oberste Epitaxialschicht 64. Jeweilige ohmsche Kontakte 66 und 67 sind an der obersten Schicht 64 und an der weiteren Schicht 62 angeordnet und die Oberseite der Fotodiode wird mit einer antireflektierenden Beschichtung 68 abgedeckt.

[0084] Der Übergang ist mit dem Bezugszeichen 65 angedeutet und ein weiterer ohmscher Kontakt für Erdungszwecke, wie dies vorstehend beschrieben wurde, ist mit 69 bezeichnet.

[0085] Bei einer anderen Ausführungsform kann die Erfindung als eine aus Siliziumkarbid gebildete Fotodiode angesehen werden, die ein monokristallines Siliziumkarbidsubstrat enthält, einen ersten monokristallinen Bereich aus Siliziumkarbid auf dem Substrat, der vom ersten Leitfähigkeitstyp ist, einen zweiten monokristallinen Bereich aus Siliziumkarbid, der benachbart zum ersten Bereich ist und der einen entgegengesetzten Leitfähigkeitstyp gegenüber dem ersten Bereich aufweist. Ein p-n-Übergang wird zwischen dem benachbarten ersten und zweiten Bereich gebildet, was zu einer Dunkelstromdichte von nicht mehr als 1×10^{-9} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und bei Temperaturen von 170°C oder weniger führt.

[0086] Weil die Minoritätsträger thermisch erzeugt werden, wurde festgestellt, daß der Dunkelstrom für eine erfindungsgemäße Diode wesentlich mit niedrigeren Temperaturen abnimmt, so daß bei einer bevorzugten Ausführungsform der p-n-Übergang zu einer Dunkelstromdichte von nicht mehr als etwa 1×10^{-11} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und bei Temperaturen von 100°C oder weniger führt. Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform liefert der Übergang eine Dunkelstromdichte von nicht mehr als etwa 7×10^{-13} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und bei Temperaturen von 60°C oder weniger. Fotodioden gemäß der vorliegenden Erfindung können gemäß den Herstellungsverfahren hergestellt werden, die in den verwiesenen Patentschriften diskutiert werden. Insbesondere können die erfindungsgemäßen Fotodioden durch Bildung einer Epitaxialschicht aus Siliziumkarbid auf einem massiven monokristallinen Siliziumkarbidsubstrat gebildet werden, wobei dann eine zweite Epitaxialschicht auf der ersten Epitaxialschicht aufgebracht wird, um als oberste Schicht der Fotodiode zu dienen. Relativ kleine ohmsche Kontakte sind auf den obersten Bereichen dieser Bauelemente angeordnet, um Störungen mit dem einfallenden Licht zu minimieren, während große ohmsche Kontakte unbeeinflusst von dem einfallenden Licht an dem Substrat oder anderen Bereichen vorgesehen sein können, um den Kontaktwiderstand zu reduzieren. Typischerweise werden diese Kontakte gekühlt, um ein geeignetes ohmsches Verhalten zu liefern.

[0087] Wenn, wie dies bereits früher erwähnt wurde, Epitaxialschichten zwischen Bereichen von Alpha-Siliziumkarbid gebildet werden, wird dies entsprechend der Lehre des in Bezug genommenen US-Patentes US 4,912,064 getan. Wenn eine Epitaxialschicht aus Beta-Siliziumkarbid auf ein Alpha-Siliziumkarbid aufgebracht werden soll, wird diese Technik entsprechend den Lehren des in Bezug genommenen US-Patentes US 4,912,063 ausgeführt. Schließlich wird, wo der Übergang mittels Ionenimplantation gebildet werden soll, dies entsprechend den Lehren des US-Patentes US 5,087,576 A erfolgen.

[0088] In einer anderen Hinsicht enthält die Erfindung ein Verfahren zur Feststellung und Messung von UV-Strahlung. Das Verfahren besteht aus dem Aussetzen einer Fotodiode mit elektromagnetischer Strahlung, wobei die Fotodiode durch angrenzende Bereiche aus Siliziumkarbid gebildet wird, die jeweils p-leitende und n-leitende Leitfähigkeiten mit einem p-n-Übergang zwischen den jeweiligen Gebieten aufweisen und wobei die Diode eine Dunkelstromdichte von nicht mehr als etwa 1×10^{-9} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und bei einer Temperatur von etwa 170°C oder weniger aufweist. Wie denjenigen, die mit der Betriebsweise derartiger Bauelemente vertraut sind, bekannt ist, ist der Dunkelstrom temperaturabhängig, während alle anderen Gegebenheiten gleichbleibend sind. Deshalb kann das Verfahren in analoger Weise für verschiedene Temperaturen ausgedrückt werden, wobei dies bereits vorher in Tabelle 1 dargestellt ist. Als exemplarische Werte kann jedoch das Verfahren enthalten, daß eine Diode bestrahlt wird, die eine Dunkelstromdichte von nicht mehr als etwa 1×10^{-11} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und einer Temperatur von 100°C oder weniger hat, oder die eine Dunkelstromdichte von nicht mehr als etwa 7×10^{-13} Ampere/cm² bei einer Sperrvorspannung von -1.0 Volt und einer Temperatur von 60°C oder weniger hat.

[0089] In den Zeichnungen und der Beschreibung sind bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung offenbart worden. Obwohl spezielle Ausdrücke verwendet wurden, sind diese nur in einem allgemeinen und beschreibenden Sinn verwendet worden und nicht zum Zwecke der Beschränkung, wobei der Schutzzumfang der Erfindung in den sich anschließenden Ansprüchen dargestellt ist.

Patentansprüche

1. Hochempfindliche Fotodiode zur Feststellung von UV-Strahlung mit einem Einkristall-Substrat (11) aus Siliziumkarbid, das einen ersten Leitfähigkeitstyp hat, einer ersten Epitaxialschicht (12) aus Siliziumkarbid auf dem Substrat (11), die den gleichen Leitfähigkeitstyp wie das Substrat (11) hat, einer oberen, der einfallenden elektromagnetischen Strahlung ausgesetzten Epitaxialschicht (13) aus Siliziumkarbid auf der ersten Epitaxialschicht (12), die den entgegengesetzten Leitfähigkeitstyp wie die erste Epitaxialschicht (12) hat und mit dieser einen p-n-Übergang (14) bildet, und mit ohmschen Kontakten (15; 16) an der oberen Epitaxialschicht (13) und dem Substrat (11), **dadurch gekennzeichnet**, daß die erste Epitaxialschicht (12) eine soviel niedrigere Trägerkonzentration hat als die obere Epitaxialschicht (13), daß sich das Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (14) bei Gleichgewicht vorherrschend in der ersten Epitaxialschicht (12) ausbildet, daß die erste Epitaxialschicht (12) eine definierte Dicke hat, die zur Unterstützung des Verarmungsgebietes ausreicht und die größer ist als die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der ersten Epitaxialschicht (12), so daß Elektronenlochpaare, die durch Absorption von Photonen in der ersten Epitaxialschicht (12) erzeugt werden, innerhalb ihrer Trägerlebensdauer in dieses Verarmungsgebiet diffundieren, daß die obere Epitaxialschicht (13) eine definierte Dicke hat, die kleiner ist als die Dicke der ersten Epitaxialschicht (12) und größer als die Dicke des Verarmungsgebietes in der oberen Epitaxialschicht (13) bei Vorspannung Null, und die gleichzeitig klein genug ist, daß die Absorption von UV-Strahlung in der oberen Epitaxialschicht (24) vermeiden wird und Strahlung im Ultraviolett-Bereich vorherrschend Träger im Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (14) erzeugt, und daß die Trägerkonzentration in der oberen Epitaxialschicht (13) groß genug ist, um den Serien- und Flächenwiderstand zu reduzieren.

2. Fotodiode nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (11) p-leitend, die erste Epitaxialschicht (12) p-leitend und die obere Epitaxialschicht (13) n-leitend ist.

3. Fotodiode nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (11) n-leitend, die erste Epitaxialschicht (12) n-leitend und die obere Epitaxialschicht (13) p-leitend ist.

4. Fotodiode nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der oberen Epitaxialschicht (13) ausreichend größer ist als die Dicke des ohmschen Kontaktes (15) für die obere Epitaxialschicht (13), um eine Kurzschlußbildung des ohmschen Kontaktes (15) durch die obere Epitaxialschicht (13) zu der nebenliegenden ersten Epitaxialschicht (12) zu vermeiden.

5. Fotodiode nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (11), die erste Epitaxialschicht (12) und die obere Epitaxialschicht (13) aus einem einzigen Polykristall aus Siliziumkarbid gebildet sind, der aus einer 6H-, 4H-, 2H-, 15R- und 3C-Kristalle enthaltenden Gruppe ausgewählt ist.

6. Fotodiode nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß auf der oberen Epitaxialschicht (13) eine antireflektierende Beschichtung (17) vorgesehen ist.

7. Hochempfindliche Fotodiode zur Feststellung von UV-Strahlung mit einem Einkristall-Substrat (21) aus Siliziumkarbid, das einen ersten Leitfähigkeitstyp hat, einer ersten Epitaxialschicht (23) aus Siliziumkarbid auf einer weiteren Epitaxialschicht (22) aus Siliziumkarbid, die den gleichen Leitfähigkeitstyp wie die weitere Epitaxialschicht (22) hat, wobei die weitere Epitaxialschicht (22) sich auf dem Substrat (21) befindet und den entgegengesetzten Leitfähigkeitstyp wie das Substrat (21) hat, einer oberen, der einfallenden elektromagnetischen Strahlung ausgesetzten Epitaxialschicht (24) aus Siliziumkarbid auf der ersten Epitaxialschicht (23), die den entgegengesetzten Leitfähigkeitstyp wie die erste Epitaxialschicht (23) hat und mit dieser einen p-n-Übergang (25) bildet, und mit ohmschen Kontakten (26; 27) an der oberen Epitaxialschicht (24) und entweder an der ersten oder an der weiteren Epitaxialschicht (23; 22), **dadurch gekennzeichnet**, daß die erste Epitaxialschicht (23) eine soviel niedrigere Trägerkonzentration hat als die obere Epitaxialschicht (29), daß sich das Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (25) bei Gleichgewicht vorherrschend in der ersten Epitaxialschicht (23) ausbildet, daß die erste Epitaxialschicht (23) eine definierte Dicke hat, die zur Unterstützung des Verarmungsgebietes ausreicht und die größer ist als die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der ersten Epitaxialschicht (23), so

daß Elektronenlochpaare, die durch Absorption von Photonen in der ersten Epitaxialschicht (23) erzeugt werden, innerhalb ihrer Trägerlebensdauer in dieses Verarmungsgebiet diffundieren, daß die obere Epitaxialschicht (24) eine definierte Dicke hat, die kleiner ist als die Dicke der ersten Epitaxialschicht (23) und größer als die Dicke des Verarmungsgebietes in der oberen Epitaxialschicht (24) bei Vorspannung Null, und die gleichzeitig klein genug ist, daß die Absorption von UV-Strahlung in der oberen Epitaxialschicht (24) vermieden wird und Strahlung im Ultraviolett-Bereich vorherrschend Träger im Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (25) erzeugt, und daß die Trägerkonzentration in der oberen Epitaxialschicht (24) groß genug ist, um den Serien- und Flächenwiderstand zu reduzieren.

8. Hochempfindliche Fotodiode nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die obere Schicht (13) eine Dicke von nicht mehr als etwa 300 Nanometer hat.

9. Fotodiode nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (11) Alpha-Siliziumkarbid enthält und eine ebene Grenzschichtoberfläche aufweist, die mit mehr als ein Grad gegenüber der Achse einer Basisfläche im wesentlichen gegen eine der (1120) Richtungen geneigt ist, und daß die erste Epitaxialschicht (12) Alpha-Siliziumkarbid enthält, das homoepitaxial auf der Grenzschichtoberfläche des Substrates (11) aufgebracht ist.

10. Fotodiode nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (11) 6H-Alpha-Siliziumkarbid und die erste Epitaxialschicht (12) Beta-Siliziumkarbid enthält, das epitaxial in der [111] Wachstumsrichtung auf der (0001) Si-Seite des Substrates (11) aufgebracht ist, so daß sich der (111) Kristallbau des Dünnschichtes aus Beta-Siliziumkarbid an den (0001) Kristallbau des Substrates (11) aus 6H-Siliziumkarbid anpaßt und so daß die Beta-Siliziumkarbid (101) Seite parallel zu der 6H-Siliziumkarbid (1120) Seite ist und die Beta-Siliziumkarbid (111) Seite parallel zu der 6H-Siliziumkarbid (0001) Seite.

11. Fotodiode nach Anspruch 8, 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Trägerkonzentration der oberen Epitaxialschicht (13) um soviel größer ist als die Trägerkonzentration der ersten Schicht (12), daß sich das Verarmungsgebiet des p-n-Überganges (14) vorherrschend in der ersten Epitaxialschicht (12) ausbildet.

12. Hochempfindliche Fotodiode nach dem Oberbegriff von Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die obere Schicht (24) eine Dicke von nicht mehr als etwa 300 Nanometer hat.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

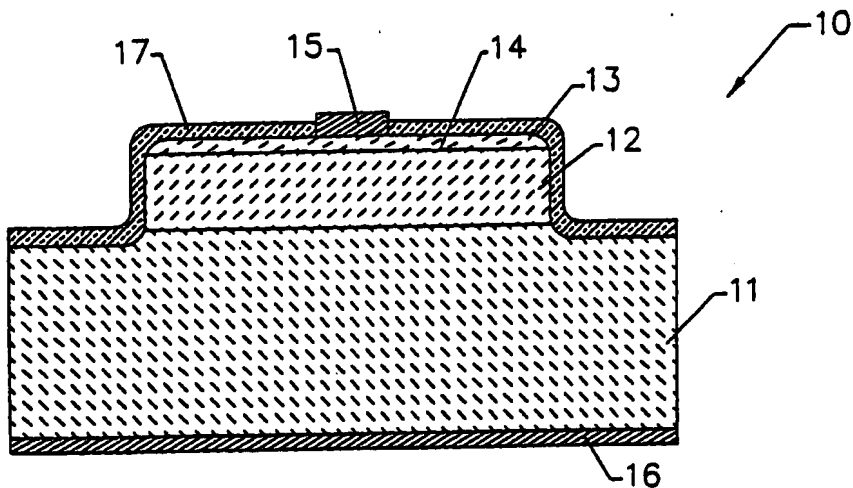


FIG. 1. *

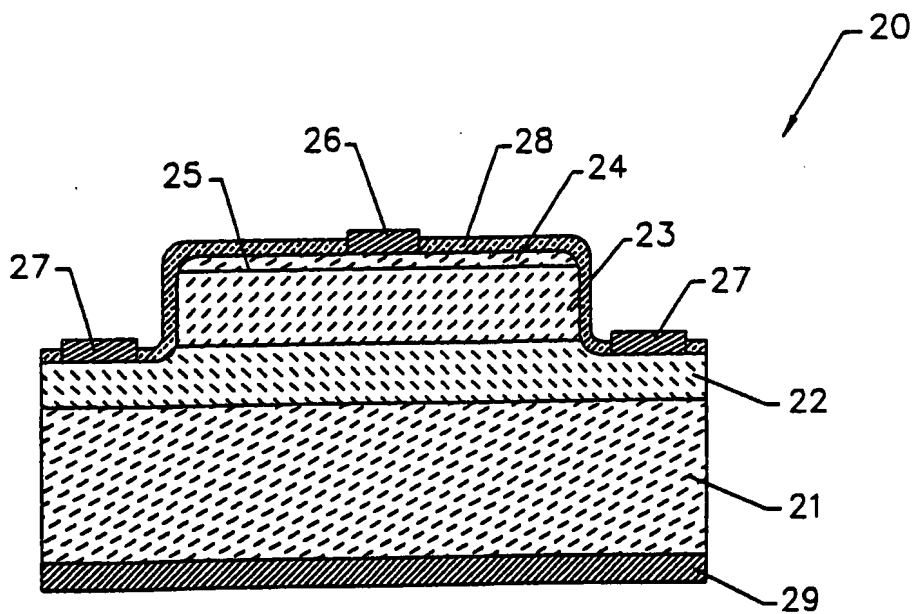


FIG. 2.

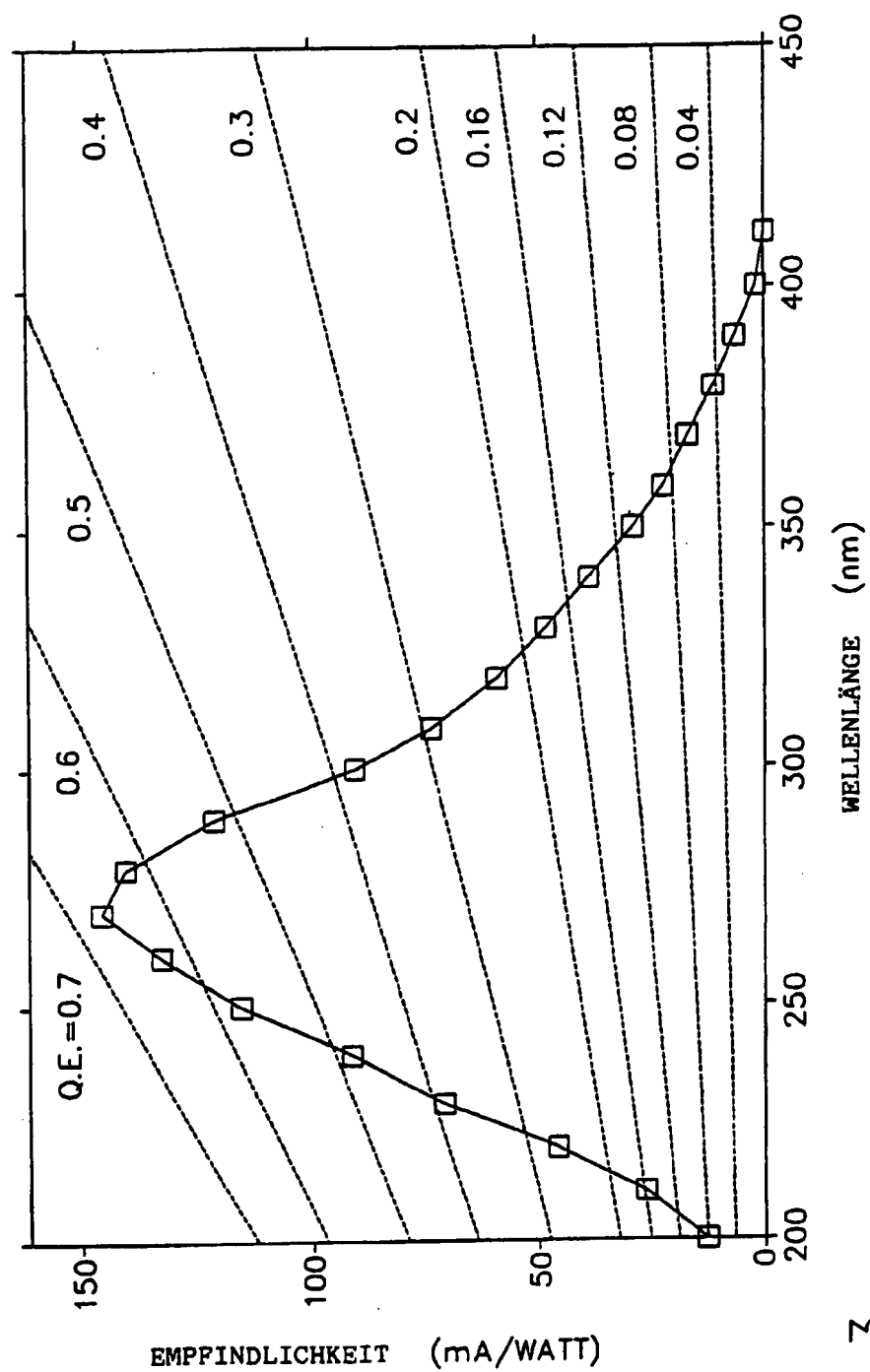


FIG. 3.

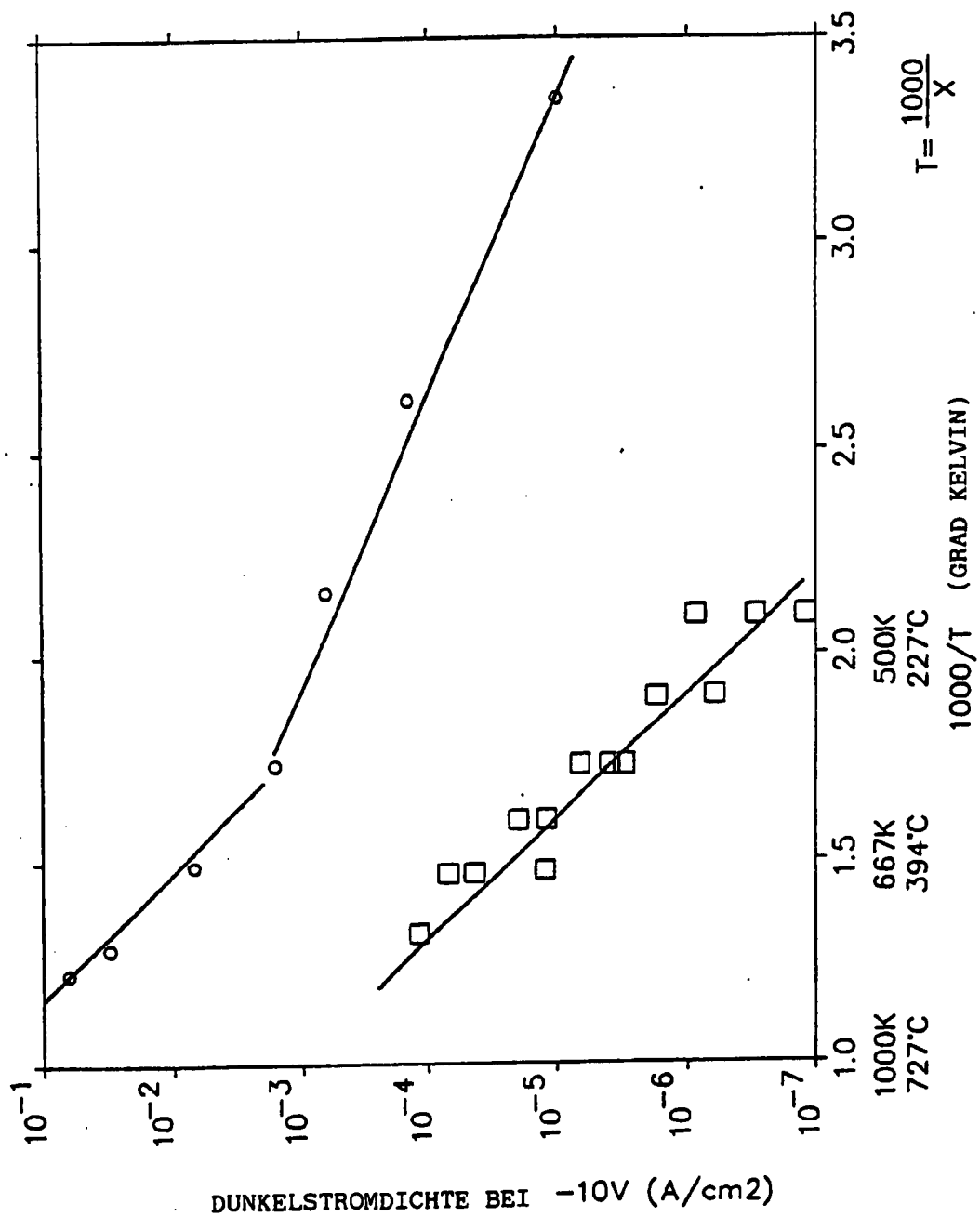


FIG. 4.

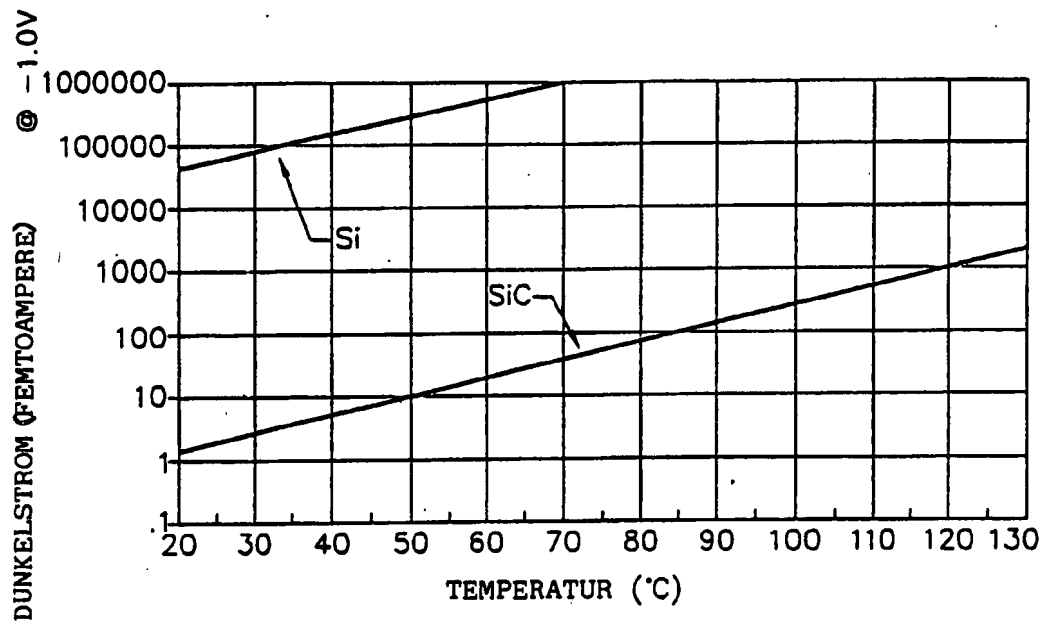


FIG. 5.

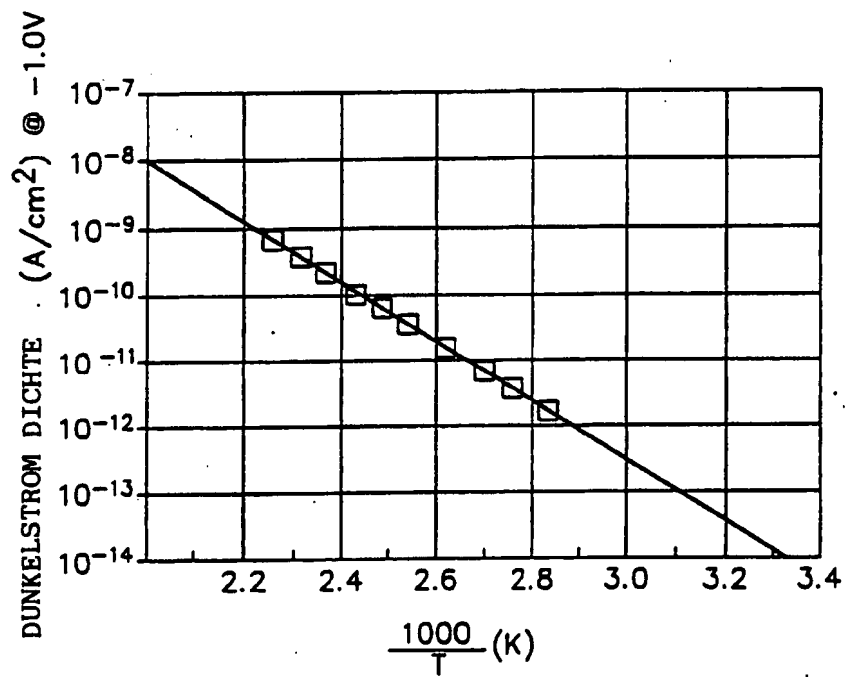


FIG. 6.

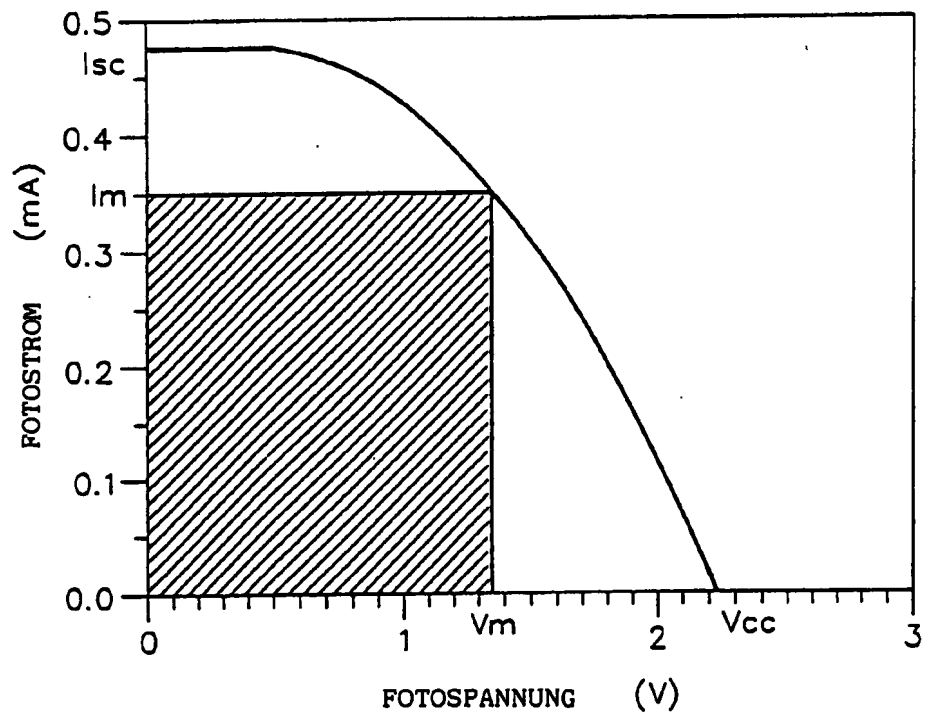


FIG. 7.

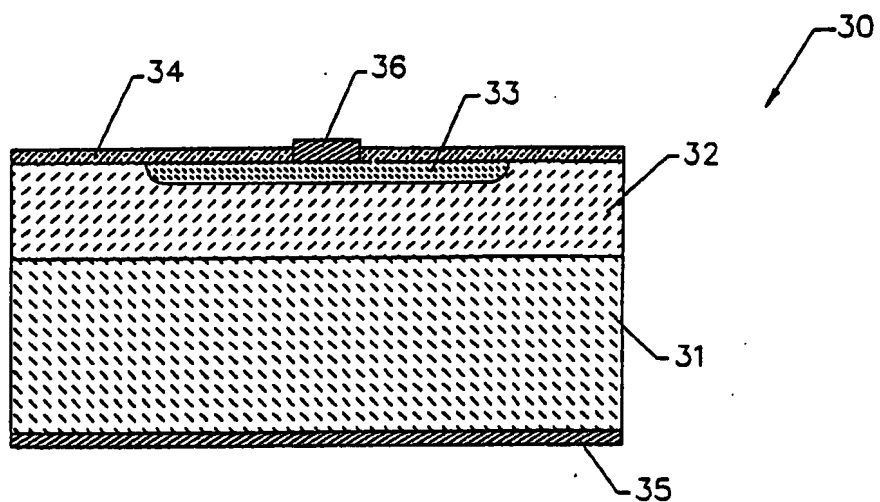


FIG. 8.

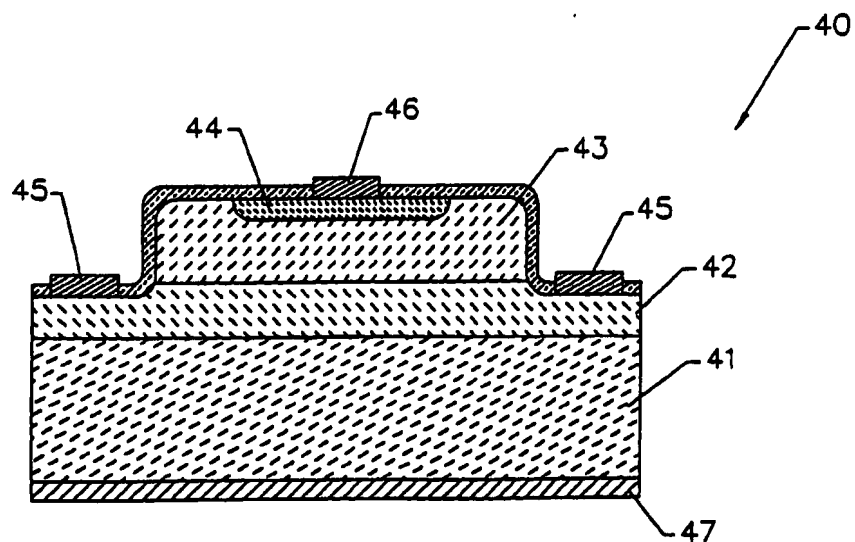


FIG. 9.

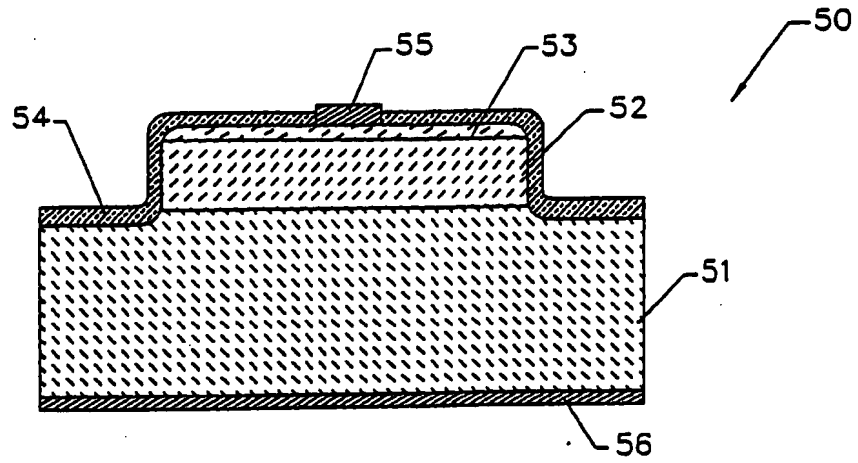


FIG. 10.

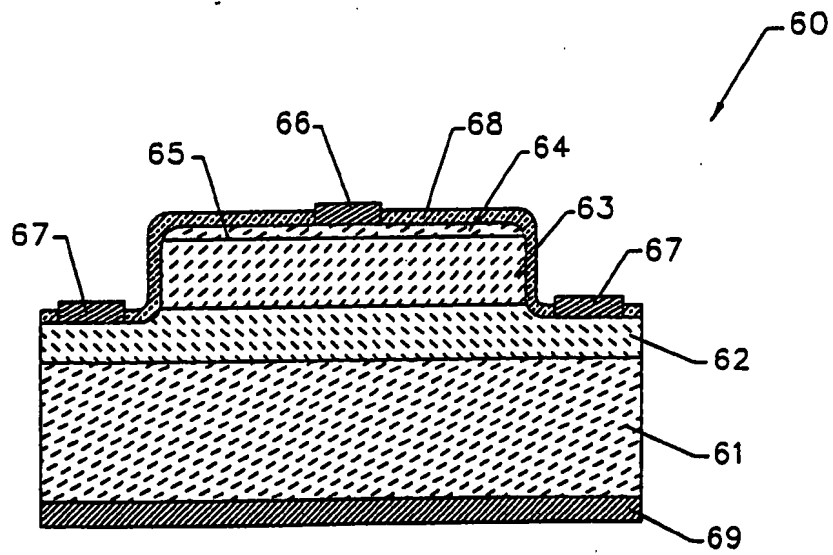


FIG. 11.